



**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra kybernetiky a biomedicínského**  
**inženýrství**

**Modelování a analýza šíření akustického**  
**signálu**

**Modelling and Analysis of Acoustic Signal**  
**Progression**

**2013**

**Jakub Gintar**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

## Zadání bakalářské práce

Student: **Jakub Gintar**  
Studijní program: B2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 2601R004 Měřicí a řídicí technika  
Téma: Modelování a analýza šíření akustického signálu  
Modelling and Analysis of Acoustic Signal Progression

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor problematiky šíření akustického signálu.
2. Návrh a realizace metod pro analýzu a modelování akustického signálu.
3. Řešení modelu pro šíření akustického signálu.
4. Srovnání modelovaných výsledků s praktickým ověřením a s teoretickými předpoklady.
5. Zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] SEDLÁČEK, Miloš a Radislav ŠMÍD. *MATLAB v měření*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 2004, 204 s. ISBN 80-010-2851-8.
- [2] HUMLHANS, Jan a Radislav ŠMÍD. *Zajímavá zapojení: inspirace konstruktérům. 4. díl, Zapojení s diodami LED, zapojení s optočleny, různá zapojení, rejstřík*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 143 s. Inspirace konstruktérům. ISBN 80-730-0153-5.
- [3] NEVŘIVA, Pavel. *Analýza signálů a soustav*. 1. vyd. Praha: BEN-Technická literatura, 2000. 672 s. ISBN 80-7300-004-0.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Macháček, Ph.D.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 31.07.2013

doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 31.7.2013

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Jiříka J. M.', is written over a horizontal dotted line.

Podpis

## Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Zdeňku Macháčkovi, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této práce.

# Obsah

1	Úvod .....	6
2	Rozbor problematiky šíření akustického signálu .....	7
2.1	Akustika .....	7
2.2	Základní pojmy v akustice .....	7
2.2.1	Zvuk, šíření zvuku .....	7
2.2.2	Šíření akustického signálu v reálném prostředí .....	8
2.2.3	Perioda, vlnová délka .....	9
2.2.4	Rychlost šíření akustického signálu .....	9
2.2.5	Kmitočet .....	10
2.3	Decibelové stupnice .....	10
2.3.1	Hladina akustického výkonu .....	10
2.3.2	Hladina akustického tlaku .....	11
3	Měření a analýza šíření akustického signálu .....	12
3.1	Realizace měření .....	13
3.1.1	Měření v čase .....	14
3.1.2	Měření v délce .....	24
3.2	Další způsob měření vlastností akustického signálu .....	28
4	Řešení modelu pro šíření akustických signálů .....	29
4.1	Modelování naměřených výsledků .....	29
4.1.1	Modelování okamžitých tlaků .....	29
4.1.2	Modelování hladin akustických tlaků .....	31
4.2	Modelování šíření akustického signálu .....	33
5	Srovnání dosažených výsledků .....	35
6	Závěr .....	36
	Seznam použité literatury .....	37
	Seznam použitých symbolů a zkratk .....	38
	Příloha na CD .....	

# 1 Úvod

Jedna z prvních věcí, kterou vnímáme svými smysly je zvuk. Podle některých zdrojů, na různé zvukové podněty reagují mimina už během vývoje v těle matky. Celá řada živočichů se orientuje, nebo přežívá jen za pomoci zvuku, zvukových vln a to i v neslyšitelném spektru, například netopýři používají echolokaci (vydání akustického signálu do prostoru, který se o jakoukoliv překážku odrazí a vrátí se zpět do místa vysílání kde je zachycen) k lovu.

Zvuk nás neustále obklopuje, má vliv na naši psychiku a na naši náladu. Oblíbená hudební skladba nás dokáže uklidnit, nebo nás naopak nabije energií. Tyto a mnohé další důvody ovlivnily výběr této bakalářské práce.

Cílem práce je provést modelování a analýzu šíření akustického signálu. Šíření zvuku je samo o sobě velmi obsáhlá věda, na kterou by nestačily všechny strany této práce. Proto bylo rozhodnuto, že bude tato práce zaměřena především na šíření zvuku ve volném prostoru, kde nedochází k odrazům, ohybům a ke zkreslení akustického signálu.

V teoretické části se seznámíme se základními pojmy v akustice, jako je frekvence, vlnová délka, ale také například s akustickým tlakem, nebo s rychlostí šíření zvuku. Bude zde popsána problematika šíření akustického signálu, řekneme si, na čem jsou jednotlivé pojmy závislé a co ovlivňuje jejich vlastnosti.

Praktická část je rozdělena na dva dílčí okruhy, zaměřené nejvýznamnější vlastnosti akustického signálu, a to rychlost šíření zvuku a hladiny akustického tlaku. Cílem první části je ověření teoretických předpokladů pro šíření akustického signálu. Ověření jsem prováděl pomocí měření akustických signálů v akustické bezdovukové komoře, která má stejné fyzikální vlastnosti jako volný prostor, což je prostředí, ve kterém nevznikají při šíření zvuku nežádoucí vlivy (odrazy, ohyby zvuku, apod.). Princip prvního měření, nazvaného jako „měření v čase“ spočívalo na měření zpoždění vysílaných signálů s různou frekvencí v závislosti na vzdálenosti od zdroje. Z jednotlivých naměřených výsledků se poté vypočítala rychlost šíření akustické signálu ve vzduchu.

Při druhém měření „měření v délce“ se měřily jedny z nejvýznamnějších vlastností zvuku, a to hladiny akustických tlaků, a okamžité tlaky. Obě veličiny jsou závislé na vzdálenosti, kdy se při zvětšující vzdálenosti od zdroje zvuku snižuje jejich hodnota.

Následující praktickou částí bylo modelování šíření zvuku. Modelování probíhalo pomocí sofistikovaného softwaru MATLAB (matrix laboratory). V něm se pomocí implementací matematických rovnic a algoritmů sestavil model pro šíření zvuku ve volném prostoru. Tento model je navržen jako GUI (Graphical User Interface – grafické uživatelské rozhraní), které uživateli usnadňuje práci s modelem a editaci hodnot a nastavení.

Následuje kapitola zabývající se porovnáním a zhodnocením dosažených výsledků, ať už teoretických, naměřených, nebo namodelovaných.

## 2 Rozbor problematiky šíření akustického signálu

### 2.1 Akustika

Akustika je vědní obor, zabývající se zvukem od jeho vzniku, přenosu až po jeho vnímání.

Zabývá se celou řadou dalších poddisciplín, například:

- *Psychoakustika* vnímání zvuku v mozku
- *Fyziologická akustika* vznik zvuku v hlasovém orgánu člověka a jeho vnímání v uchu
- *Hudební akustika* zkoumá fyzikální základy hudby, hudebních nástrojů a hudebních prostorů
- *Stavební akustika* zabývá se zvukovými jevy v uzavřeném prostoru, budovách a stavbách.
- *Prostorová akustika* zabývá se šířením zvuku v obecném prostoru.

### 2.2 Základní pojmy v akustice

#### 2.2.1 Zvuk, šíření zvuku

Zvukem se rozumí každé mechanické vlnění v látkovém prostředí, které je schopno vyvolat v lidském uchu sluchový vjem. Frekvence tohoto vlnění leží přibližně v rozsahu 20 Hz až 20 kHz, toto rozmezí je označováno jako slyšitelné pásmo. Zvuk s frekvencí nižší než 20 Hz se nazývá infrazvuk. Frekvence zvuku vyšší než 20 kHz se nazývají ultrazvuk.

Tato práce se bude zabývat především problematikou akustických signálů ve slyšitelném pásmu.

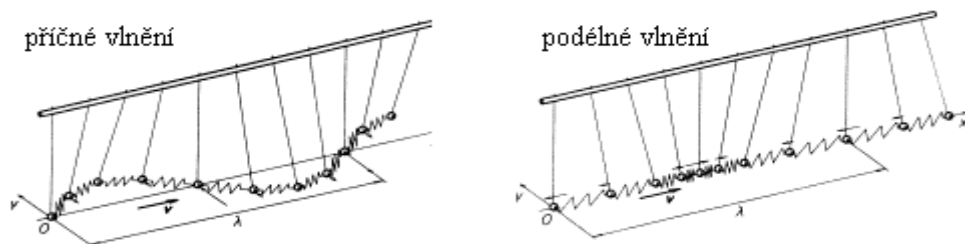
Zvuk se šíří plyny, pevnými látkami i tekutinami ve formě zvukových vln. Šíření zvukových vln je v různých látkách rozdílné. Zvuk se šíří pouze v hmotném prostředí, z toho vyplývá, že ve vakuu nemůže nastat šíření zvuku, protože vakuum neobsahuje žádné hmotné částice.

Podle toho, zda částice prostředí kmitají ve směru šíření vlnění, nebo kolmo k němu, dělíme vlnění na podélné a příčné:

**Příčné vlnění** – hmotné body pružného prostředí kmitají kolmo na směr, kterým vlnění postupuje.

**Podélné vlnění** – částice pružného prostředí kmitají ve směru, kterým vlnění postupuje.





Obr. 2.1 Příčné a podélné vlnění

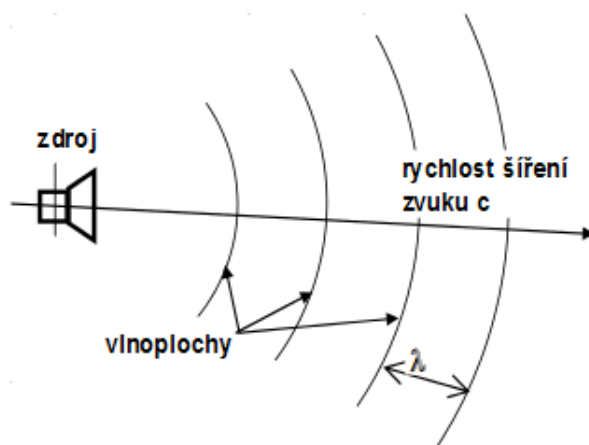
Pokud se všechny kmity dějí v jedné rovině, říkáme o takovém vlnění, že je lineárně polarizované. U plynů a kapalin se může vyskytovat pouze podélné akustické vlnění, jelikož tyto látky jsou pružné pouze ve smyslu objemové stlačitelnosti.

U materiálů elastických se může vyskytovat vlnění podélné i příčné, protože vykazují pružnost nejenom v tahu a v tlaku, ale i smyku. Kombinací z těchto namáhání vzniká i kmitání ohybové.

## 2.2.2 Šíření akustického signálu v reálném prostředí

Zvuk se šíří od zdroje ve vlnoplochách (Obr. 2.2). Ve volném prostředí mohou mít kulový nebo rovinný tvar, který se však může změnit například odrazem, průchodem překážkou apod. Za rovinnou vlnoplochu považujeme též kulovou vlnu, která byla vytvořena zdrojem zvuku ve značné vzdálenosti a kde již zakřivení vlny nehraje žádnou roli (poloměr pomyslné koule je už tak velký že její výseč ve sledovaném bodě může být nahrazen rovinnou plochou).

Akustické pole je prostor, ve kterém se šíří zvuk, přičemž podle charakteru rozlišujeme pole rovinné, kulové a difuzní (obecné, tvořené vlnami různých tvarů).



Obr. 2.2 Šíření zvuku ze zdroje ve formě vlnoploch

Při šíření zvuku prostředím s překážkami (reálné prostředí), dochází při dopadu zvukové vlny na některou překážku k mnoha jevům, při kterých se část zvuku přemění na jinou formu energie (teplo). Obecně se část zvuku odrazí, část akustické energie se přemění v teplo, část překážkou projde, popřípadě se šíří překážkou samotnou. Zvuk se také může kolem překážky ohnout, může ji rozkmitat tak, že se vlny odečtou a překážka se začne chovat jako by veškerou akustickou energii pohlcovala, dále se vlny sčítají s jinými vlnami, podléhají tlumení apod.

Tyto jevy závisí na rozměrech, tvaru a složení překážky, dále na vlnové délce zvukové vlny atd.

### 2.2.3 Perioda, vlnová délka

Perioda – doba trvání jednoho cyklu periodického děje, je převrácenou hodnotou její frekvence. Značí se „T“ a fyzikální rozměr má shodný jako čas – sekundy.

Vlnová délka pak zohledňuje rychlost šíření signálu v prostředí a vyjadřuje, jakou vzdálenost urazí signál za dobu jedné periody. Značí se „ $\lambda$ “ (lambda) a rozměr má stejný jako míra vzdálenosti – metr. Jde tedy o součin rychlosti šíření „c“ a periody „T“.

### 2.2.4 Rychlost šíření akustického signálu

Rychlost šíření akustického signálu závisí na fyzikálním stavu prostředí, ve kterém se šíří (hustota, teplota, u vzduchu atmosférický tlak a vlhkost).

Pro vzduch s atmosférickým tlakem 1013.25 hPa v nulové nadmořské výšce při teplotě vzduchu 20 °C je rychlost šíření akustického signálu  $c = 343$  m/s.

Obecný vzorec pro výpočet rychlosti šíření akustického signálu ve vzduchu:

$$c = (331,8 \text{ m/s} + 0,6 \cdot t) [\text{m/s}] \quad (2.2.1)$$

t – teplota vzduchu [°C]

Standardizovaná hodnota 340 m/s pak odpovídá teplotě 13,6 °C.

Další příklady rychlosti šíření zvuku v různých látkách jsou uvedeny v tabulce č. 2. 1.

Látka:	vzduch	voda	sklo	ocel
$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	1,275	998	2400 - 2800	7850
c [m·s <sup>-1</sup> ]	340	1500	4500 - 5100	5000 - 6000

Tab. 2. 1 Příklady rychlosti šíření zvuku v různých látkách

Rychlost zvuku v tělese závisí nejen na vlastnostech jeho látky (na jejích modulech pružnosti a hustotě), ale i na tvaru tělesa a na tom, jsou-li vlny podélné, nebo příčné. Údaje uvedeny v tabulce jsou tedy jen orientační.

V podstatě platí, že čím je hustota látky vyšší, tím rychleji se danou látkou zvuk šíří.

## 2.2.5 Kmitočet

Kmitočet  $f$  [Hz] (frekvence) určuje počet kmitů za sekundu, které vykoná kmitající hmotný bod. Mezi dobou kmitu a frekvencí platí jednoduchý vztah:

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.2.2)$$

Podobně je možné přepočítat úhlový kmitočet  $\omega$  [ $s^{-1}$ ] na kmitočet  $f$  [Hz] podle vzorce:

$$\omega = 2\pi f \quad (2.2.3)$$

## 2.3 Decibelové stupnice

Hladiny akustických veličin plynou z Weberova – Fechnerova zákona, který zjednodušeně říká: *„Akustické veličiny, které se mění geometrickou řadou, vnímá lidské ucho jako řadu aritmetickou. Násobky akustického signálu jsou uchem vnímány jako přírůstky“*.

Podle Weber – Fechnerova zákona lze prokázat logaritmickou závislost mezi objektivními akustickými veličinami a subjektivním vjemem člověka. V technické akustice byl zaveden pojem „hladin“ jednotlivých akustických veličin, jejichž veličinou je „decibel“ [dB]. Při použití decibelových stupnic je důležité stanovit referenční hodnotu. Například mezi referenčními hodnotami 1W a  $10^{-12}$ W je v decibelových stupnicích konstantní rozdíl 120 dB.

Převod geometrické řady na aritmetickou umožňuje funkce logaritmus.

### 2.3.1 Hladina akustického výkonu

Hladina akustického výkonu  $L_W$  je absolutní míra hluku (akustický výkon zdroje), která produkuje jeho zdroj vyjádřená v decibelech.

Hladina akustického výkonu  $L_W$  [dB] je definována vztahem:

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad (2.3.1)$$

kde:  $W$  [W] je sledovaný akustický výkon  
 $W_0$  [W] je referenční akustický výkon,  $W_0 = 10^{-12} W$

## 2.3.2 Hladina akustického tlaku

Nejslabší zvukový signál, který je ještě schopen zaznamenat nepoškozený lidský sluch, odpovídá dvaceti miliontinám základní jednotky tlaku 1 Pa, což je akustický tlak 20 μPa. Tato hodnota je  $5 \cdot 10^9$  krát menší než normální barometrický tlak. Změna tlaku o 20 μPa je tak malá, že vyvolává vychýlení membrány lidského sluchového orgánu o hodnotu menší než je průměr jednoho jediného atomu. Lidské ucho je schopno snášet akustické tlaky více než  $10^6$  krát větší. Navíc lidský sluchový orgán rozlišuje tzv. barvu zvuku, což souvisí se schopností rozpoznávat zvuky různých kmitočtů.

Pro akustický tlak byla zavedena příslušná hladina, kterou je nutno vztahovat vždy k určitému kmitočtu, nebo pásmu kmitočtů. Jinak nemá pouhý údaj hladiny akustického tlaku význam, neboť nevypovídá nic o poloze signálu na kmitočtové ose.

Hladina akustického tlaku  $L_p$  [dB] je definována vztahem:

$$L_p = 10 \log \frac{p}{p_r} \quad (2.3.2)$$

kde  $p$  [Pa] je sledovaný akustický tlak (efektivní hodnota),  
 $p_r$  [Pa] je referenční akustický tlak,  $p_r = 20 \mu\text{Pa}$

Akustický tlak $p$ [Pa]	Akustická intenzita $I$ [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ]	Hladina akustického tlaku $L_p$ [dB]	Příklad prostředí, kde se vyskytuje
Cca 60	Cca 10	Cca 130	Práh bolesti
2	$10^{-2}$	100	Diskotéka
0,2	$10^{-4}$	80	Rušná ulice
0,02	$10^{-6}$	60	Kancelář
0,002	$10^{-8}$	40	Obývací pokoj
0,0002	$10^{-10}$	20	Ložnice v noci
0,00002	$10^{-12}$	0	Práh slyšení

Tab. 2. 2 Příklady hladin akustického tlaku

### 3 Měření a analýza šíření akustického signálu

Jak bylo řečeno v úvodu, tato práce je zaměřena na analýzu šíření akustického signálu ve volném prostoru, ve kterém nenastávají jevy jako odraz zvuku, jeho ohyb, nebo útlum zvuku vlivem různých překážek. Měření ve volném prostoru si můžeme představit jako měření na vrcholu vysoké věže za bezvětrí a za stálých klimatických podmínek (stálá teplota a vlhkost prostředí), kde se může akustický signál volně šířit do všech směrů. V praxi by byla realizace takového měření v podstatě nemožná, proto se k akustickým měřením využívají tzv. akustické komory.

Jedna akustická bezdozvuková komora se nachází v areálu CPIT VŠB – Technické univerzity Ostrava, ve které bylo po domluvě s pracovníkem CPIT Ing. Michalem Weiszem umožněno měření k této bakalářské práci a také zde byly zapůjčeny veškeré potřebné měřicí přístroje.

Bezdozvukové komory umožňují měření hlukových parametrů veškerých zařízení, jako jsou ventily, škrtkové prvky aj. Slouží také k měření akustických vlastností různých komerčních zařízení, popřípadě testování citlivostí akustických prvků.

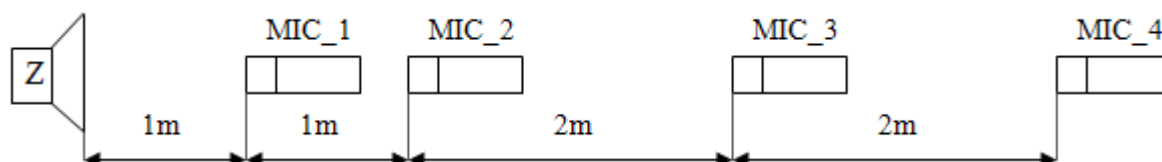
Základním stavebním prvkem těchto komor jsou klíny z absorpčních materiálů např. skelná vata, které jsou vyřezány vodním paprskem. Tvar a velikost klínu je vždy závislá na rozměrech komory, kdy se vždy jedná o kompromis mezi poznatky o mechanických a akustických vlastnostech porézních materiálů. Klíny jsou také opatřeny průzvučným potahem, který jednak stabilizuje tvar klínu a také zabraňuje vypadávání minerálních vláken z použitého porézního materiálu. Tyto klíny jsou umístěny na zdech a stropě a v některých případech také na podlaze akustických komor. Funkcí klínů není jen pohlcování zvuku a tudíž zabránění nežádoucím odrazům zvuku, ale zároveň izolují akustickou komoru od vnějšího hluku, a díky tepelné izolaci použitých materiálů udržují klíny v akustické komoře konstantní teplotu.



Obr. 3.1 Klíny na stěně akustické komory

## 3.1 Realizace měření

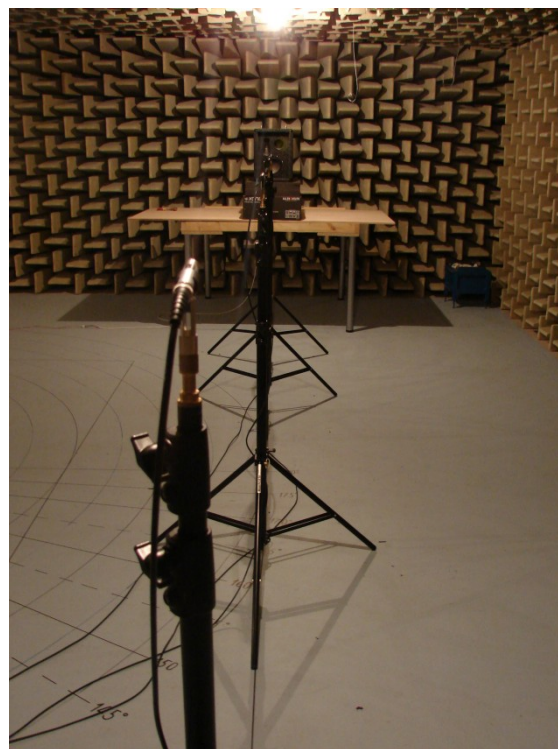
Pro měření šíření akustického signálu bylo použito měřicího generátoru, zesilovače, čtyř mikrofónů a zdroje zvuku. Rozmístění měřících přípravků je zobrazeno na (Obr. 3.2)



Obr. 3.2 Schéma rozmístění měřících přípravků

Jak je patrné z (Obr. 3.2) zdroj zvuku a měřící mikrofony byly umístěny v jedné rovině (za sebou) vzdálené od sebe 1 metr (pro první dva mikrofony) a 2 metry pro zbylé dva mikrofony, ve výšce 1,30m.

Pro lepší představu o rozmístění měřících přípravků jsou zde přiložené fotografie z bezdozvukové komory pořízené během měření (Obr. 3.3 - 4).



Obr. 3.3 – 4 Rozmístění měřících přípravků během měření.

Pro analýzu šíření akustického signálu byla provedena dvě měření, a to měření v čase a měření v délce. Pro obě měření byl použit měřicí řetězec, který je znázorněn na Obr. 3.2.

#### **Použité přístroje:**

Zdroj zvuku – 2 pásmový reproduktor

4x mikrofón Brüel & Kjær typ 2671 – vlastnosti:

Citlivost 50 mV/Pa

Frekvence 20 Hz – 20 kHz

Dynamický rozsah 14,6 – 138 dB

Akustický analyzátor

Zesilovač

### **3.1.1 Měření v čase**

Pomocí měření v čase se změří a následně vypočte rychlost šíření akustického signálu, a také bude ověřeno, zda má frekvence signálu vliv na rychlost šíření zvuku.

Rychlost šíření zvuku se vypočte pomocí obecného vzorce pro výpočet rychlosti:

$$c = \frac{s}{t}, [m \cdot s^{-1}] \quad (3.1.1)$$

Teplota vzduchu při realizaci měření v akustické laboratoři byla:  $t = 21,5^{\circ}\text{C}$ . Teoretická rychlost šíření zvuku v laboratoři se vypočte dle (2.1.1):

$$c = (331,57 + 0,607 \cdot t) = (331,57 + 0,607 \cdot 21,5) = 344,62 \text{ m s}^{-1}$$

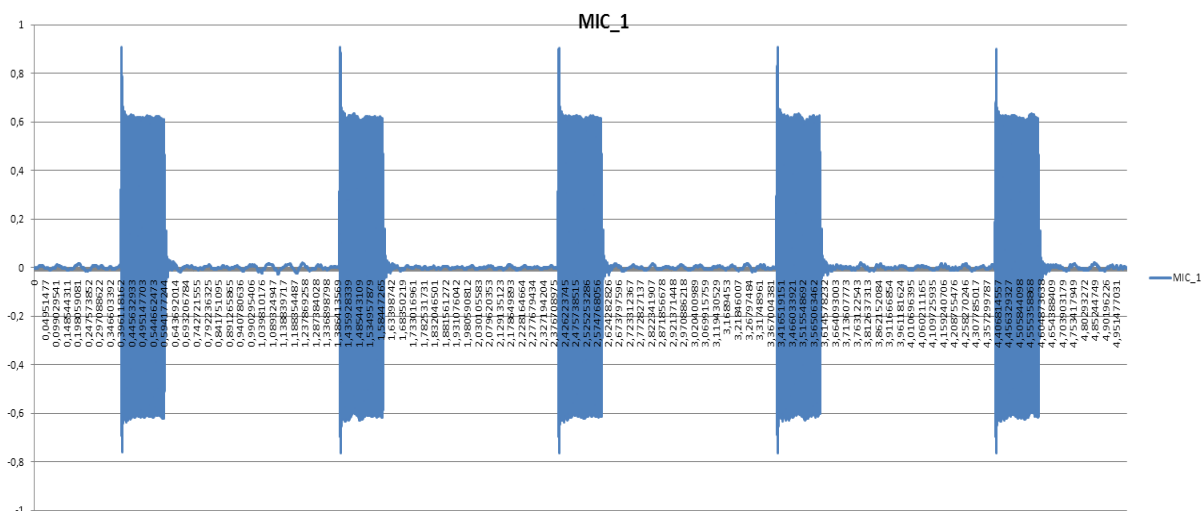
Měření v čase spočívalo v měření tří harmonických signálů o frekvencích 250Hz, 1000Hz a 8000Hz. Dále bylo provedeno jedno měření se širokopásmovým šumem. Doba snímání jednotlivých signálů byla 5s. Signál z měřicího generátoru byl záměrně přerušován, a to z důvodu získání více náběžných hran (více vzorků) při jednom měření daného signálu.

Všechny naměřené hodnoty byly uloženy do poznámkových bloků a dále zpracovávány pomocí Microsoft Office Excel (viz příloha).

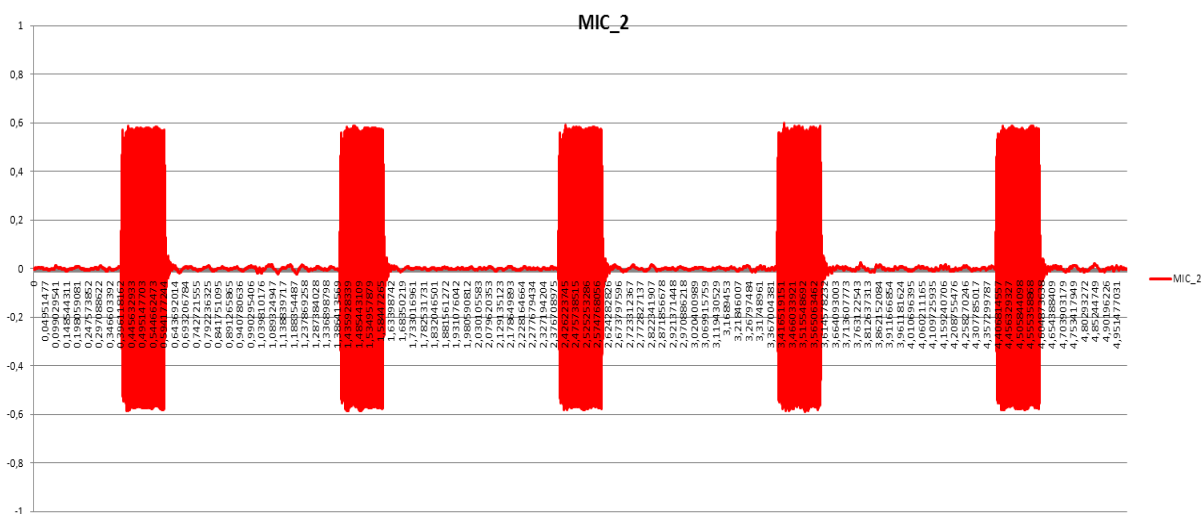
Postup měření:

#### **a) 250 Hz**

Průběhy signálu nasnímaný jednotlivými mikrofony jsou zobrazeny na Obr. 3.5-3.9.

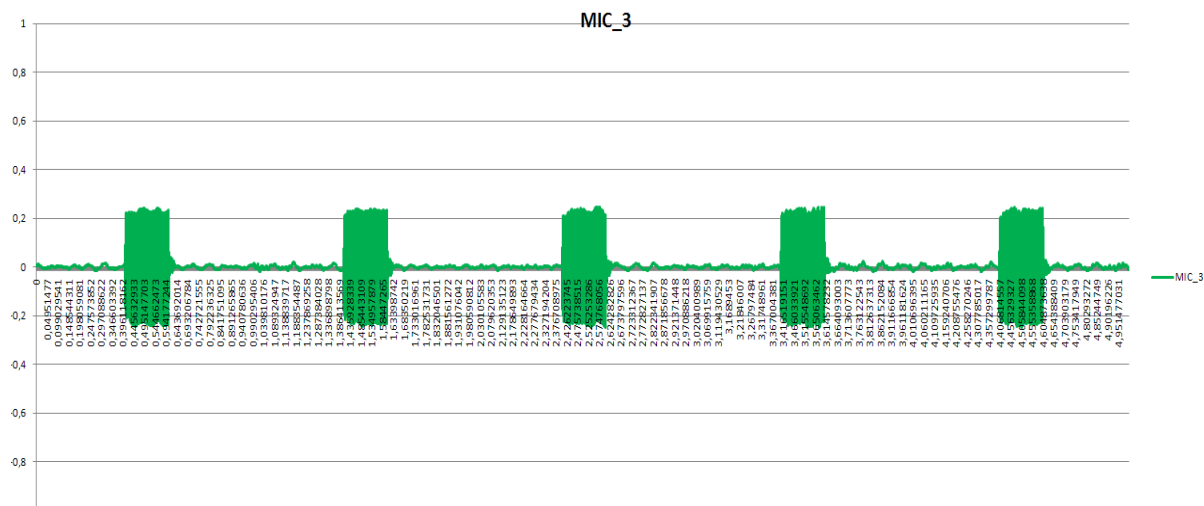


Obr. 3.5 Celý průběh sinus 250Hz na MIC\_1

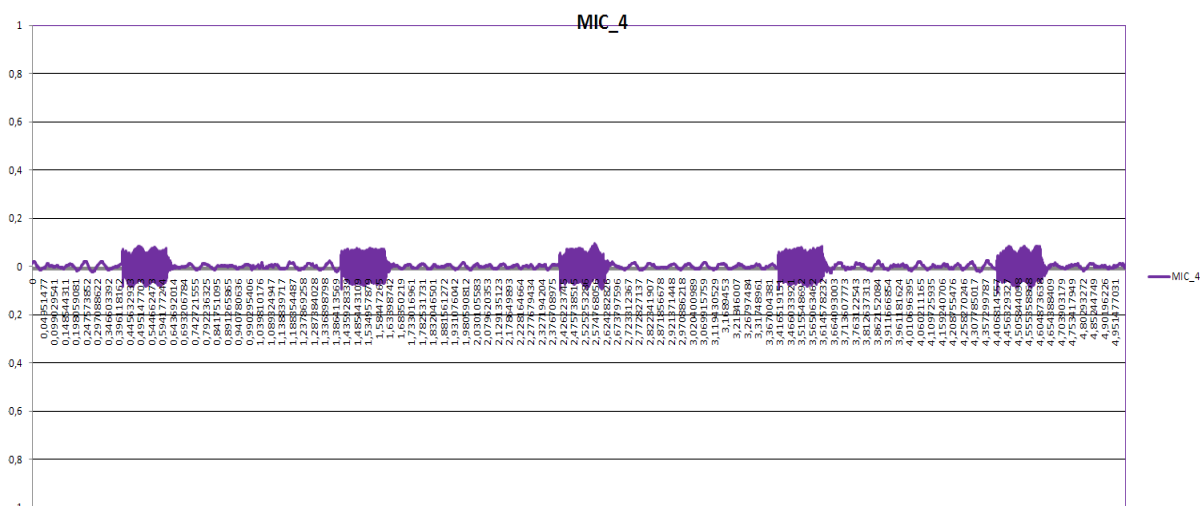


Obr. 3.6 Celý průběh sinus 250Hz na MIC\_2





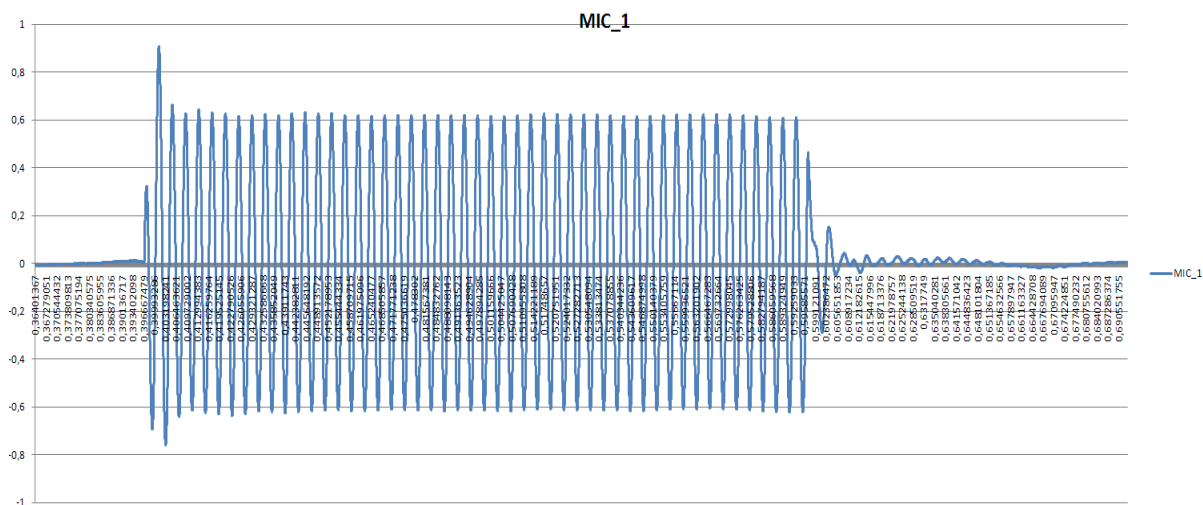
Obr. 3.7 Celý průběh sinus 250Hz na MIC\_3



Obr. 3.8 Celý průběh sinus 250 Hz na MIC\_4

Jak je patrné z obrázků 3.5-8, se zvětšující se vzdálenosti signálu od zdroje se snižuje amplituda akustického signálu.

Pro lepší přehlednost signálu je na obr. 3.9 vykreslen první průběh 250Hz na MIC\_1.



Obr. 3.9 První část 250Hz signálu snímaného MIC\_1

Díky rozmístění mikrofónů a jejich vzájemné vzdálenosti známe dráhu, kterou zvuk urazil, pro výpočet rychlosti šíření zvuku ale potřebujeme ještě znát čas, za který byla dráha uražena.

Čas vyčteme ze změřených průběhů tak, že nejprve zjistíme čas na začátku náběžné hrany signálu na jednotlivých mikrofonech, tyto časy pak mezi sebou odečteme a dostaneme čas potřebný k výpočtu (Obr. 10).

Příklad výpočtu času a rychlosti šíření akustického signálu.

$$t_1 = 0,3970 \text{ s}$$

$$t_2 = 0,3999 \text{ s}$$

$$\Delta t_{1,2} = t_2 - t_1 = 0,0029 \text{ s}$$

$$s_{1,2} = 1 \text{ m}$$

$$c_1 = \frac{s_{1,2}}{\Delta t_{1,2}} = \frac{1}{0,0029} = 344,38 \text{ ms}^{-1}$$

Ostatní vypočtené hodnoty jsou umístěny v tabulce č. 3. 1.

Dráha		Čas		Rychlost	
$s_{1,2} [\text{m}]$	1	$\Delta t_{1,2} [\text{s}]$	0,0029	$c_1 [\text{ms}^{-1}]$	344,83
$s_{2,3} [\text{m}]$	2	$\Delta t_{2,3} [\text{s}]$	0,0058	$c_2 [\text{ms}^{-1}]$	344,82
$s_{3,4} [\text{m}]$	2	$\Delta t_{3,4} [\text{s}]$	0,0058	$c_3 [\text{ms}^{-1}]$	344,82

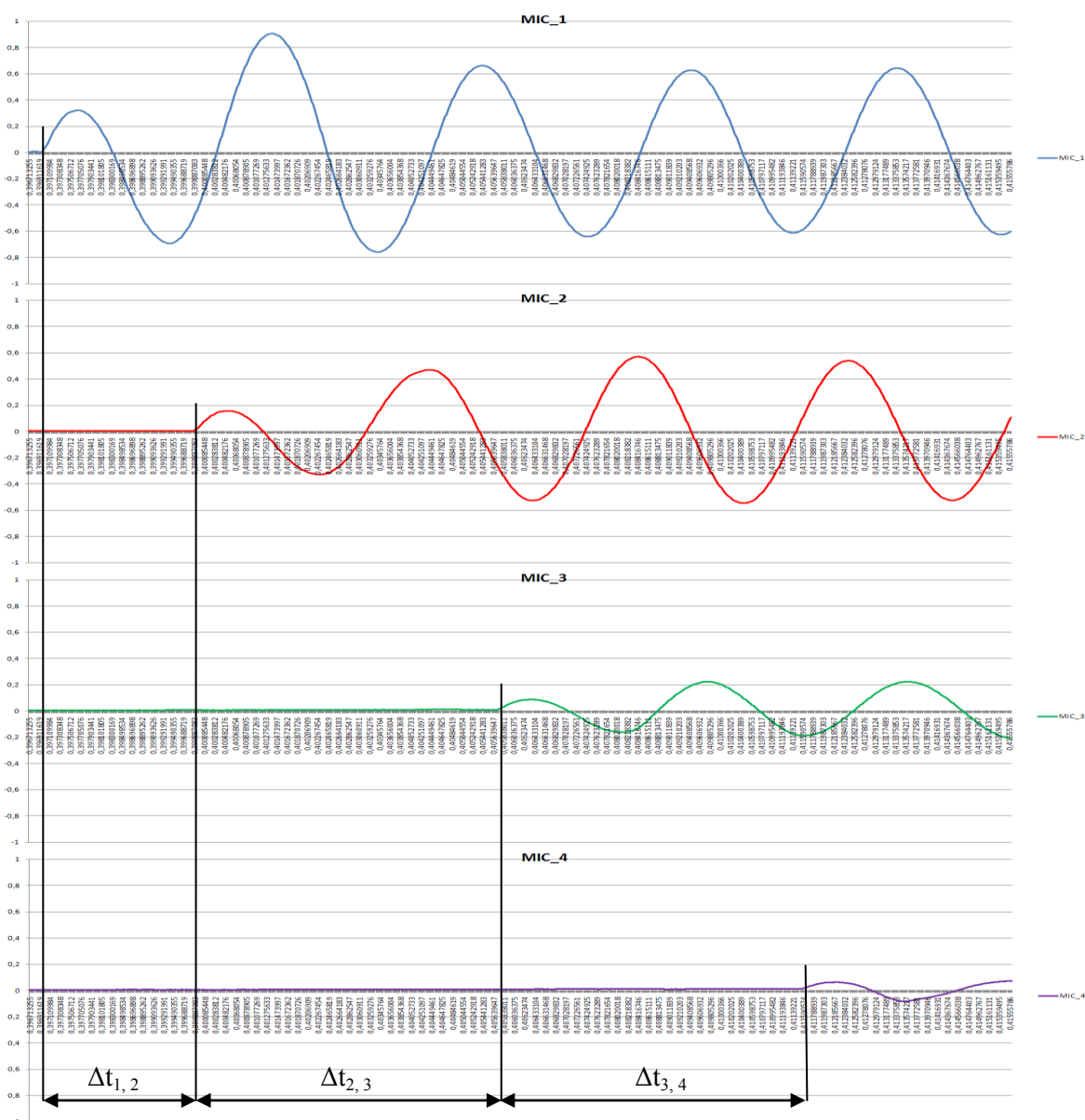
Tab. 3. 1 Rychlost šíření akustického signálu pro 250Hz

Výpočet vlnové délky pro 250 Hz.

$$f = 250 \text{ Hz}$$

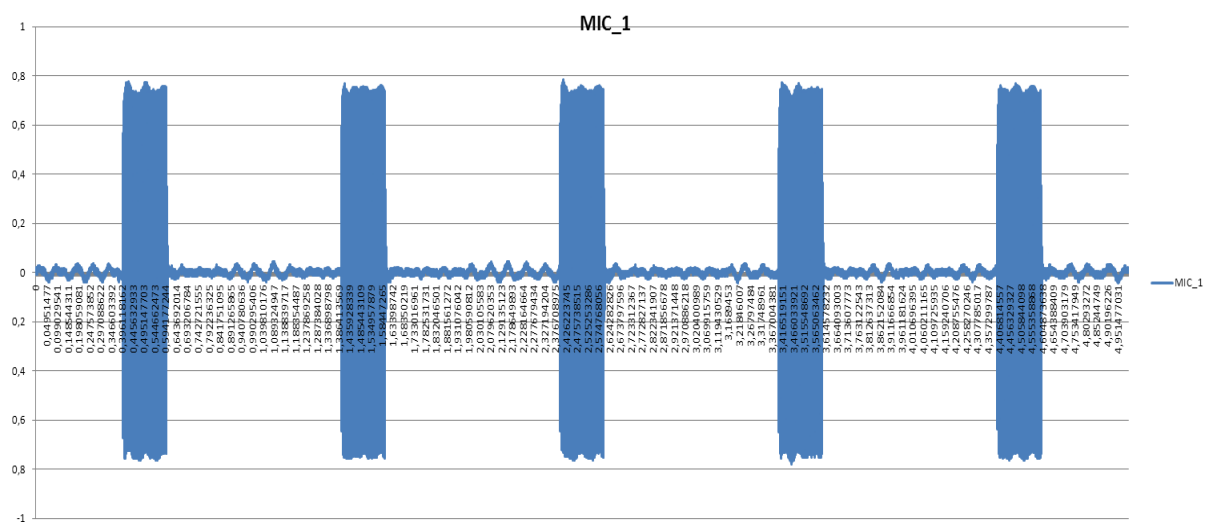
$$c = 344,82 \text{ ms}^{-1}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{344,83}{250} = 1,38 \text{ m}$$

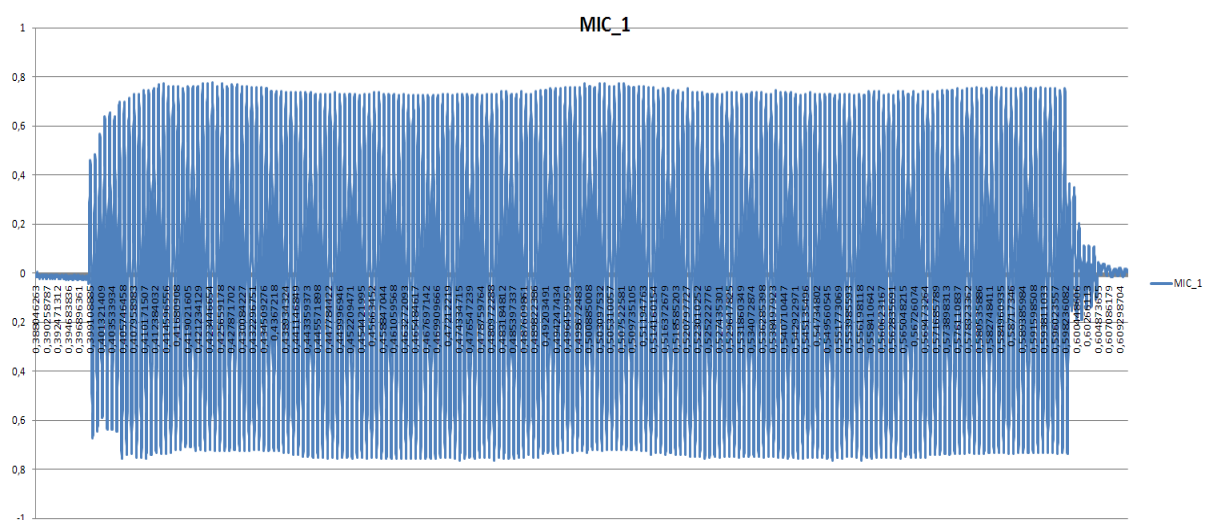


Obr. 3.10 Náběžné hrany signálů a jejich zpoždění na jednotlivých mikrofonech

b) 1000 Hz



Obr. 3.11 Průběh celého měřného 1000Hz signálu na MIC\_1



Obr. 3.12 První část 1000Hz signálu snímaného MIC\_1

Z obr. 3.13 si opět odečteme zpoždění na jednotlivých mikrofonech, vložíme je do tabulky a podle vzorečku pro šíření akustického signálu vypočítáme rychlost šíření (viz tab. 3. 2).

Dráha		Čas		Rychlost	
$s_{1,2}$ [m]	1	$\Delta t_{1,2}$ [s]	0,0029	$c_1$ [ms <sup>-1</sup> ]	344,83
$s_{2,3}$ [m]	2	$\Delta t_{2,3}$ [s]	0,0058	$c_2$ [ms <sup>-1</sup> ]	344,83
$s_{3,4}$ [m]	2	$\Delta t_{3,4}$ [s]	0,0058	$c_3$ [ms <sup>-1</sup> ]	344,82

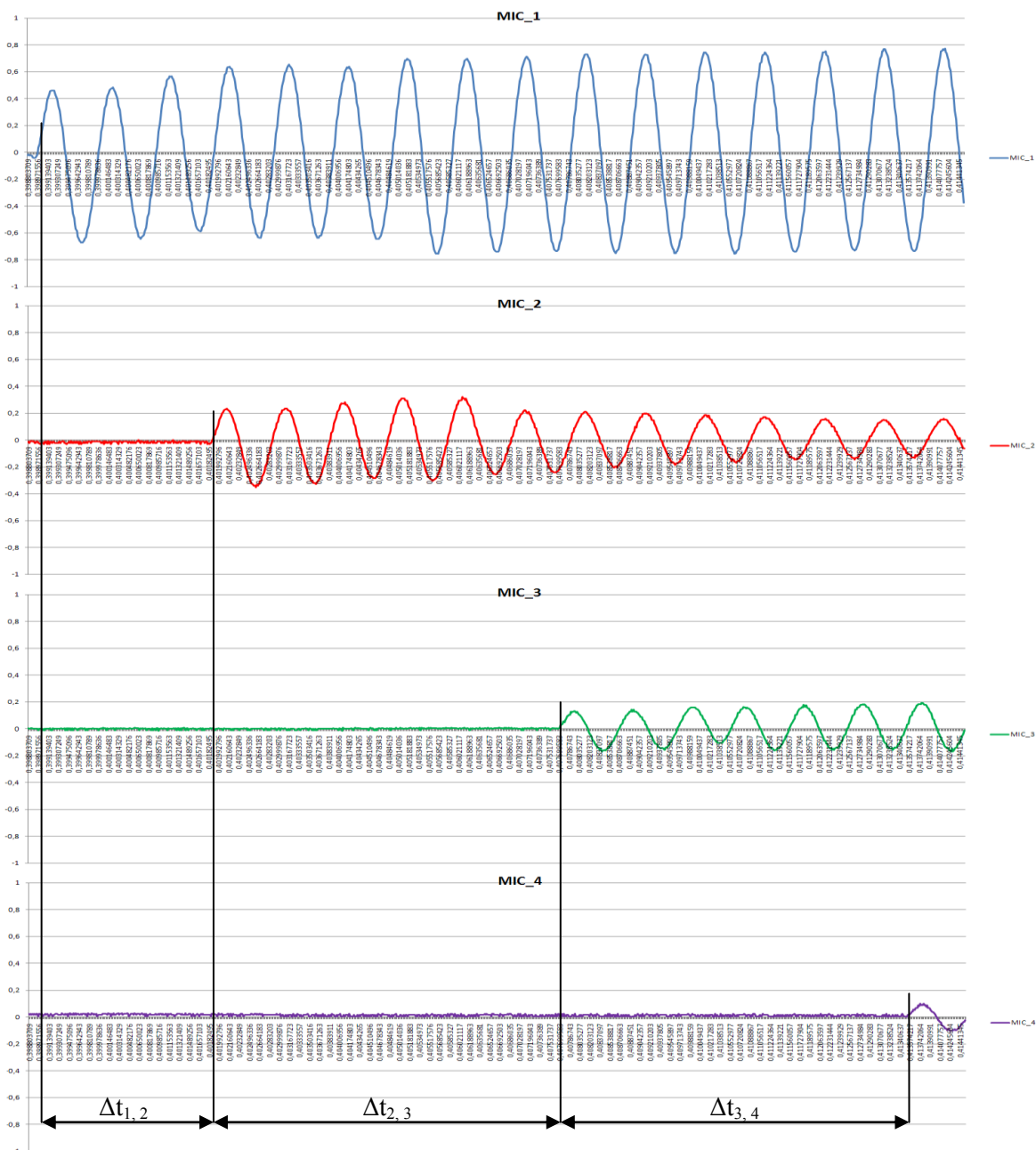
Tab. 3. 2 Rychlost šíření akustického signálu pro 1000Hz

Výpočet vlnové délky pro 1000Hz.

$f = 1000\text{Hz}$

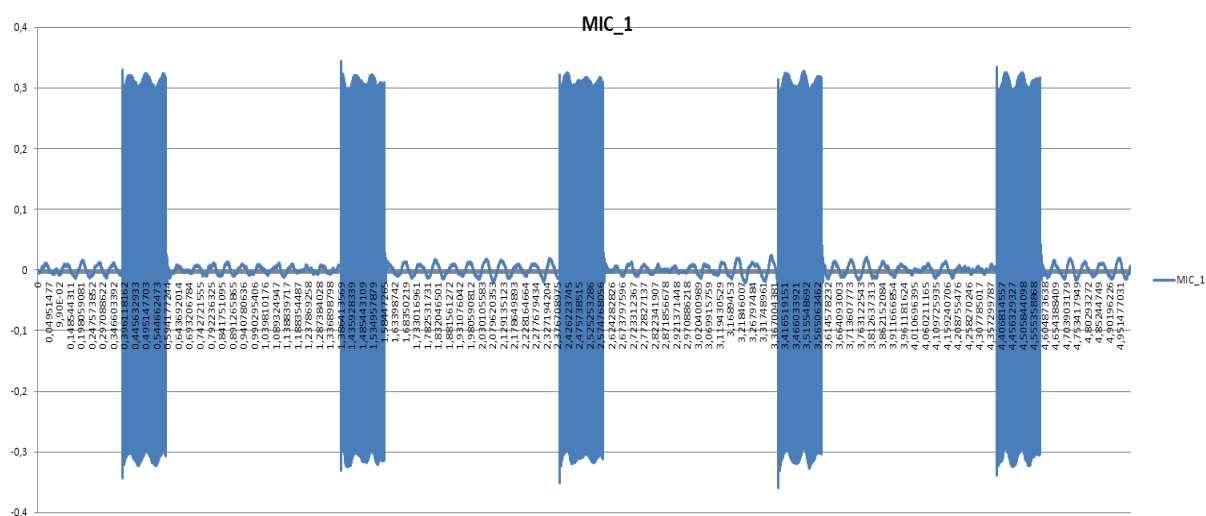
$c = 344,83 \text{ ms}^{-1}$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{344,83}{1000} = 0,34\text{m}$$



Obr. 3.13 Náběžné hrany signálu 1000Hz a jejich zpoždění na jednotlivých mikrofonech

c) 8000Hz



Obr. 3.14 Průběh celého měřeného 8000Hz signálu na MIC\_1

Dráha		Čas		Rychlost	
$s_{1,2}$ [m]	1	$\Delta t_{1,2}$ [s]	0,0029	$c_1$ [ $\text{ms}^{-1}$ ]	344,83
$s_{2,3}$ [m]	2	$\Delta t_{2,3}$ [s]	0,0058	$c_2$ [ $\text{ms}^{-1}$ ]	344,82
$s_{3,4}$ [m]	2	$\Delta t_{3,4}$ [s]	0,0058	$c_3$ [ $\text{ms}^{-1}$ ]	344,83

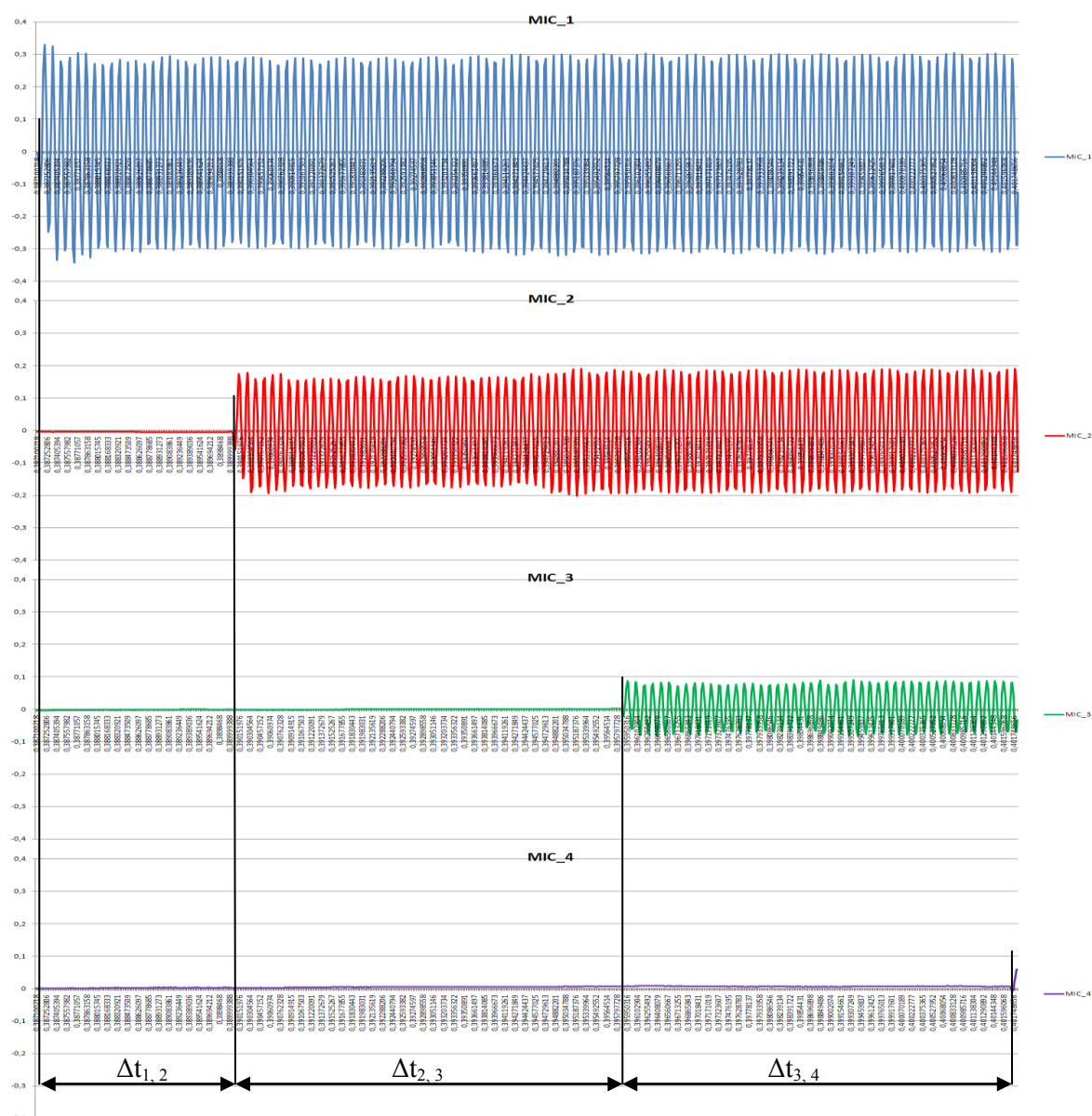
Tab. 3. 3 Rychlost šíření akustického signálu pro 8000Hz

Výpočet vlnové délky pro 8000Hz.

$$f = 8000\text{Hz}$$

$$c = 344,83 \text{ ms}^{-1}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{344,83}{8000} = 0,043\text{m}$$



Obr. 3.15 Náběžné hrany signálu 8000Hz a jejich zpoždění na jednotlivých mikrofonech

#### d) Širokopásmový šum

Zvaný též jako bílý šum, je to náhodný signál s rovnoměrnou spektrální výkonovou hustotou. Signál má stejný výkon v kterémkoliv pásmu shodné šířky. Bílý šum obsahuje všechny frekvence, ale nekonečný frekvenční rozsah signálu bílého šumu je pouze teoretický. V praxi je signál „bílý“ pokud má ploché spektrum v definovaném rozsahu frekvencí.

### Využití bílého šumu:

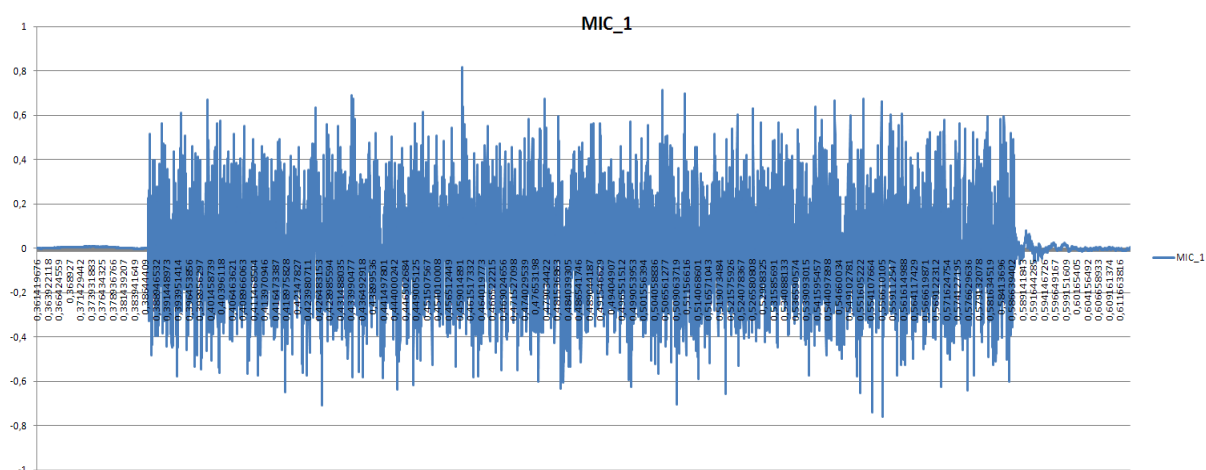
Jednou z aplikací bílého šumu je oblast architektonické akustiky. Zde je za účelem omezit rozptylující, nežádoucí zvuky (například konverzaci, atd.) ve vnitřních prostorách pouštěna nízká hladina šumu jako podkladový zvuk.

Bílý šum je používán v některých sirénách pohotovostních vozidel pro jeho schopnost proniknout ostatními zvuky prostředí (např. zvukem městské dopravy) a nezpůsobovat ozvěnu, takže je snazší určit směr, odkud přichází.

Bílý šum má také využití v elektronické hudbě, kde je používán buď přímo, nebo jako vstupní signál pro filtr k vytvoření ostatních typů šumových signálů. Je často užíván při syntéze zvuku, obvykle k napodobení perkusních nástrojů jako činely, které mají ve svém spektru silnou šumovou složku.

Šum je také užíván k nastavení ekvalizéru při ozvučování koncertů nebo jiných představení. Do PA systému vyslán krátký impuls růžového šumu, který je monitorován z různých míst. Podle odezvy lze nastavit celkovou ekvalizaci k zajištění vyrovnaného přenosu. Některé systémy mohou toto nastavení provádět automaticky. Podobně je bílý šum používán pro testování přenosové charakteristiky zesilovačů a elektronických filtrů.

Bílý šum je základem některých generátorů náhodných čísel.



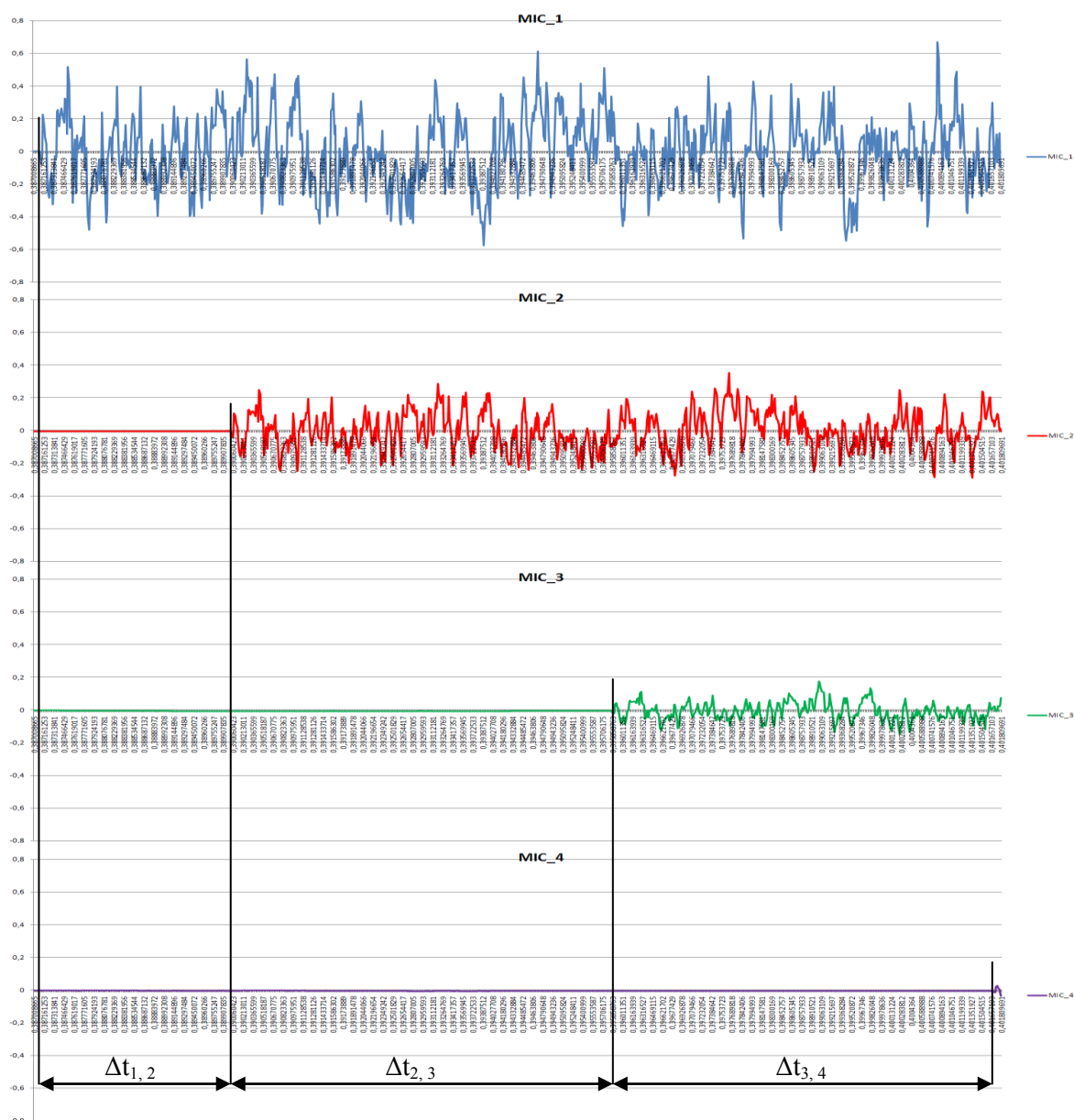
Obr. 3.16 Průběh širokopásmového šumu na MIC\_1

Zpoždění a rozdíl času signálu na jednotlivých mikrofonech se opět odečte z jejich průběhů (Obr. 3.17). Naměřené a vypočtené hodnoty jsou vloženy do tabulky 4.

Dráha		Čas		Rychlost	
$s_{1,2}$ [m]	1	$\Delta t_{1,2}$ [s]	0,0029	$c_1$ [ $\text{ms}^{-1}$ ]	344,83
$s_{2,3}$ [m]	2	$\Delta t_{2,3}$ [s]	0,0058	$c_2$ [ $\text{ms}^{-1}$ ]	344,82
$s_{3,4}$ [m]	2	$\Delta t_{3,4}$ [s]	0,0058	$c_3$ [ $\text{ms}^{-1}$ ]	344,83

Tab. 3. 4 Rychlost šíření akustického signálu pro širokopásmový šum





Obr. 3.17 Náběžné hrany širokopásmového šumu a jejich zpoždění na jednotlivých mikrofonech

### 3.1.2 Měření v délce

Při měření v délce byly měřeny hladiny akustického tlaku na jednotlivých oktávách sinusového signálu. Při měření si ověříme, zda pokles hladin akustického tlaku závisí na frekvenci a vzdálenosti od zdroje zvuku. Z naměřených hodnot hladin akustického tlaku se poté vypočítá okamžitý tlak na jednotlivých mikrofonech, pomocí kterého se vypočítají teoretické tlaky a hladiny akustického signálu.

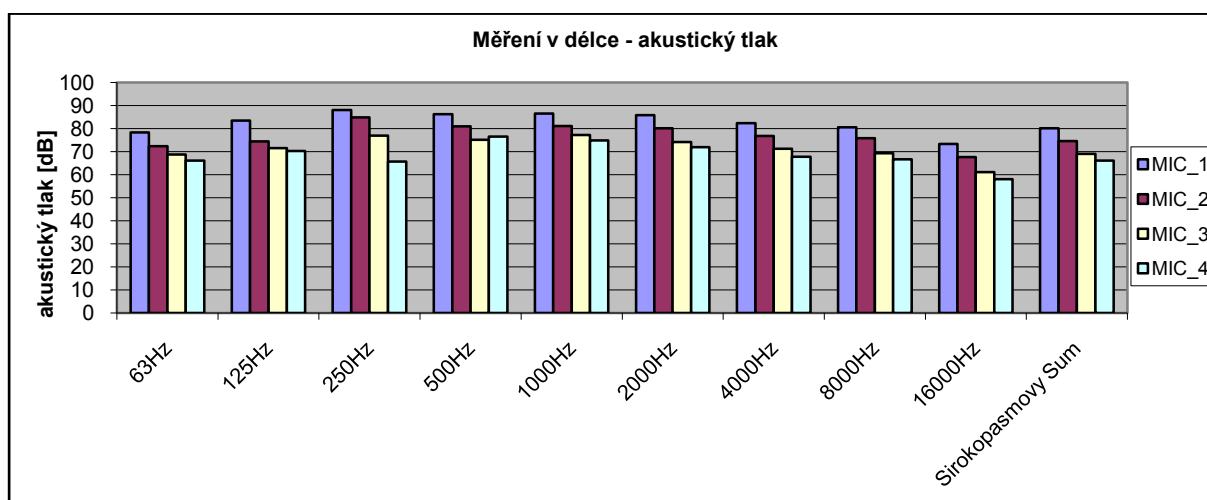
Měřicí řetězec zůstal stejný jako při měření v čase, ale změnil se způsob měření. Ze zdroje zvuku byly postupně vyzařovány akustické signály, jejichž frekvence se postupně zvětšovala. Nejnižší signál měl frekvenci 63 Hz a ta se po oktávách zvyšovala až na konečných 16000 Hz. Na závěr bylo provedeno měření se širokopásmovým šumem.

Všechny signály byly vyzařovány se stejnou intenzitou, a jednotlivé mikrofony snímaly pokles akustických hladin v závislosti na vzdálenosti od zdroje zvuku.

Naměřené hodnoty hladin akustického tlaku  $L_p$  jsou zobrazeny v tabulce 3.55.

$L_p$ [dB]	s [m]	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz	16000Hz	Bílý Šum
MIC 1	1	78,4	83,5	88	86,2	86,5	85,9	82,3	80,5	73,3	80,1
MIC 2	2	72,3	74,4	84,9	81	81,1	80,2	76,8	75,8	67,7	74,6
MIC 3	4	68,8	71,5	77	75,2	77,2	74,2	71,2	69,3	61,1	69
MIC 4	6	66,1	70,3	65,7	76,5	74,8	72	67,8	66,6	58	66,1

Tab. 3. 5 Hladiny akustického tlaku



Graf. 3.1 Závislost akustického tlaku na vzdálenosti a frekvenci

Pro ověření naměřených hodnot akustického tlaku s teoretickými předpoklady potřebujeme vypočítat okamžitou velikost tlaku v daném bodě zvukového pole. Výpočet se provede úpravou vztahu pro hladinu akustického tlaku (2.3.1):

$$L_p = 20 \cdot \log \left( \frac{p_x}{p_r} \right)$$

$$\frac{L_p}{20} = \log_{10} \left( \frac{p_x}{p_r} \right)$$

$$10^{\left(\frac{L_p}{20}\right)} = \frac{p_x}{p_r}$$

Výsledný vztah:

$$p_x = 10^{\left(\frac{L_p}{20}\right)} \cdot p_r \quad (3.1.1)$$

Pro první hodnotu okamžitého tlaku bude výpočet vypadat takto:

$$p_x = 10^{\left(\frac{78,4}{20}\right)} \cdot 2 \cdot 10^{-5} = 0,166 Pa$$

Zbýlé vypočtené hodnoty jsou v tabulce č. 3. 6.

P <sub>x</sub> [Pa]	s [m]	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz	16000Hz	Bílý Šum
MIC 1	1	0,166	0,299	0,502	0,408	0,423	0,394	0,261	0,212	0,092	0,202
MIC 2	2	0,082	0,105	0,352	0,224	0,227	0,205	0,138	0,123	0,049	0,107
MIC 3	4	0,055	0,075	0,142	0,115	0,145	0,103	0,073	0,058	0,023	0,056
MIC 4	6	0,040	0,065	0,039	0,134	0,110	0,080	0,049	0,043	0,016	0,040

Tab. 3. 6 Okamžité tlaky na mikrofonech

Díky tomu, že měření probíhalo v bezdovukové komoře, může se pro výpočet teoretické okamžité hodnoty tlaků, potřebné pro výpočet teoretické hladiny akustického tlaku použít vztah pro šíření zvuku ve volném prostředí.

$$W_1 = W_2$$

$$I_1 \cdot S_1 = I_2 \cdot S_2$$

$$\frac{p_1^2}{Z_0} \cdot S_1 = \frac{p_2^2}{Z_0} \cdot S_2$$

$$p_1^2 \cdot 2\pi r_1^2 = p_2^2 \cdot 2\pi r_2^2$$

$$p_1^2 \cdot r_1^2 = p_2^2 \cdot r_2^2 \Rightarrow p_2^2 = \frac{p_1^2 \cdot r_1^2}{r_2^2}$$

Kde, S – obsah polokoule,  $S = 2\pi r^2$

$Z_0$  – akustická impedance prostředí

Konečný vzorec vypadá takto:

$$p_x = \frac{p_1 \cdot r_1}{r_2} \quad (3.1.2)$$

Protože byl první mikrofón umístěn 1 metr od čela reprobedny, a zvuk vzniká za membránou reproduktoru (uvnitř reprobedny), tak byl první poloměr  $r_1$  zvolen jako referenční o hodnotě 1,05 m.

Výpočet pro první hodnotu:

$$p_x = \frac{0,166 \cdot 1,05}{2} = 0,87 Pa$$

Teor. $P_x$ [Pa]	s [m]	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz	16000Hz	Bílý Šum
MIC 1	1	0,166	0,299	0,502	0,408	0,423	0,394	0,261	0,212	0,092	0,202
MIC 2	2	0,087	0,157	0,264	0,214	0,222	0,207	0,137	0,111	0,049	0,106
MIC 3	4	0,044	0,079	0,132	0,107	0,111	0,104	0,068	0,056	0,024	0,053
MIC 4	6	0,029	0,052	0,088	0,071	0,074	0,069	0,046	0,037	0,016	0,035

Tab. 3.7 Teoretické hodnoty okamžitého tlaku

Z teoretické hodnoty okamžitého tlaku se může dopočítat teoretická hladina akustického tlaku, podle už výše uvedeného vztahu:

$$L_p = 20 \cdot \log \left( \frac{p_x}{p_r} \right), [dB]$$

Teor. $L_p$ [dB]	s [m]	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz	16000Hz	Bílý Šum
MIC 1	1	78,4	83,5	88,0	86,2	86,5	85,9	82,3	80,5	73,3	80,1
MIC 2	2	72,8	77,9	82,4	80,6	80,9	80,3	76,7	74,9	67,7	74,5
MIC 3	4	66,8	71,9	76,4	74,6	74,9	74,3	70,7	68,9	61,7	68,5
MIC 4	6	63,3	68,4	72,9	71,1	71,4	70,8	67,2	65,4	58,2	65,0

Tab. 3. 8 Teoretické hladiny akustického tlaku

Z tab. 3. 8 se může také vyčíst sférický útlum – klesání intenzity zvuku při vzdalování od bodového zdroje. Který se dá vyjádřit vztahem:

$$L_{p2} = L_{p1} - 20 \log \frac{r_2}{r_1}, [dB] \quad (3.1.3)$$

Z tabulky 3. 8. vidíme, že pokud je  $r_2/r_1 = 2$ , tj. vzdálení na dvojnásobek, bude mít sférický útlum hodnotu -6 dB.

Rozdíl mezi naměřeným akustickým tlakem a teoretickým akustickým tlakem nám vyjádří Tab. 3. 9.

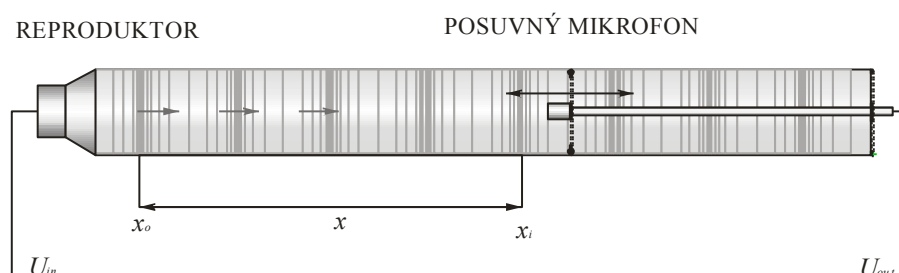
Rozdíl [dB]	s [m]	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz	16000Hz	Bílý Šum
MIC 1	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
MIC 2	2	0,503	3,503	-2,497	-0,397	-0,197	0,103	-0,097	-0,897	0,003	-0,097
MIC 3	4	-2,017	0,383	-0,617	-0,617	-2,317	0,083	-0,517	-0,417	0,583	-0,517
MIC 4	6	-2,839	-1,939	7,161	-5,439	-3,439	-1,239	-0,639	-1,239	0,161	-1,139

Tab. 3. 9 Rozdíl mezi naměřeným a teoretickým akustickým tlakem

## 3.2 Další způsob měření vlastností akustického signálu

Při absenci akustické komory je možno změřit rychlost šíření zvuku v laboratorních podmínkách pomocí Kundtovy trubice (též akustické trubice). Jedná se o skleněnou trubici, která je přibližně jeden metr dlouhá. Samotná trubice neměří přímo rychlost šíření zvuku, ale měří vlnovou délku daného akustického signálu, ze které se poté vypočte rychlost šíření.

Při mém studiu na VŠB – Technické univerzitě Ostrava, jsem se v předmětu Fyzika I. seznámil s polootevřenou Kundtovou trubicí. Měření spočívalo v tom, že se do trubice vysílal signál za pomoci reproduktoru, který byl umístěn na jedné straně trubice. Uvnitř trubice byl umístěn posuvný mikrofón, jehož výstup vedl na vstup osciloskopu (kanál X). Zároveň byl na osciloskop napojen nízkofrekvenční generátor (kanál Y). Trubice sloužila jako zpožďovací člen, tím pádem byl kanál X fázově zpožděn vůči kanálu Y. Pohybem mikrofónu v trubici se hledaly souhlasné fáze, ty se zobrazovaly na osciloskopu ve formě Lissajousových obrazců. Když byly nalezeny souhlasné fáze, Lissajousův obrazec měl tvar doprava skloněné úsečky. Poté se zapsaly všechny vzdálenosti mikrofónu od reproduktoru, při kterých se našly souhlasné fáze. Vypočetly se rozdíly mezi získanými hodnotami, tyto rozdíly představovaly polovinu vlnové délky příslušného signálu. Z vlnových délek se už poté vypočetla rychlost šíření akustického signálu ve vzduchu.



Obr. 3. 18 Kundtova trubice.

## 4 Řešení modelu pro šíření akustických signálů

Pro návrh modelu pro šíření akustického signálu byl použit software MATLAB (matrix laboratory). MATLAB je představitelem vysoce výkonného jazyka pro technické výpočty v řadě odvětví. Jeho výpočetní potenciál je používán mimo jiné pro modelování, měření a zpracování signálů, návrhy komunikačních a řídicích systému apod. Jednoduchou simulaci měřicího algoritmu nebo proces měření s využitím zásuvné desky do stolního počítače lze provést spuštěním série příkazů MATLABu zapsaných v souboru s příponou *m*, tzv. M-file.

Při složitějších výpočtech, nebo když je projekt příliš rozsáhlý a je nutno při opakovaných měřeních měnit vstupní a výstupní parametry, nebo při výpočtech editovat hodnoty, stává se M-file nevhodným, z důvodu složité editace. Opakující se editace před každým výpočtem, nebo měřením je neefektivní a časově zdoluhavá procedura. Zjednodušením se dosáhne vytvořením a využitím grafického uživatelského rozhraní MATLABu (GUI – Graphical User Interface).

Grafické uživatelské rozhraní GUI je uživatelské rozhraní složené z grafických komponent (tlačítka, textové pole, grafy, posuvníky, apod.).

### 4.1 Modelování naměřených výsledků

Vzhledem k rozměrům bezdozvukové komory bylo měření omezeno do vzdálenosti 6 metrů od zdroje zvuku. Proto bylo stěžejním modelováním zvětšení vzdálenosti, do které se zvuk mohl šířit. Tato vzdálenost byla zvětšena na 20 metrů. Tato hodnota může být lehce upravena, a to přepsáním jednoho řádku ve zdrojovém kódu.

#### 4.1.1 Modelování okamžitých tlaků

Při této modulaci byly vypočteny a následně v grafu zobrazeny teoretické hodnoty okamžitého tlaku a to do vzdálenosti dvaceti metrů.

Pro ukázkou zde umístíme jen část kódu, a to výpočet tlaků pro 63 Hz signál a porovnání čtyř signálů v jednom grafu. Kompletní zdrojový kód je vložen v příloze. Výpočet tlaků vycházel ze vzorce (3.1.2)

```
close all;          % zavře všechny grafická okna
clear all;          % vymaže proměnné z paměti
clc                 % vymaže command window v matlabu
r1 = 1.05;          % referenční vzdálenost
m = 2:2:20          % vzdálenost do které byl zvuk snímán
r = [r1 m]          % rozmístění "měřicích bodů"
```

```
% výpočet teoretického okamžitého tlaku:
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% 63Hz %%%

p1 = 0.166;      % tlak na prním mikrofonu
fprintf ('***** 63Hz *****');
p63Hz = [p1 ((p1*r1)./m)] % výpočet tlaků pro 63 Hz

% vykreslení grafu:
figure()
plot (r, p63Hz, '-xr');
title ('Závislost tlaků na vzdálenosti pro 63Hz');
xlabel ('vzdálenost [m]');
ylabel ('tlak [Pa]');

```

Výpis z command window :

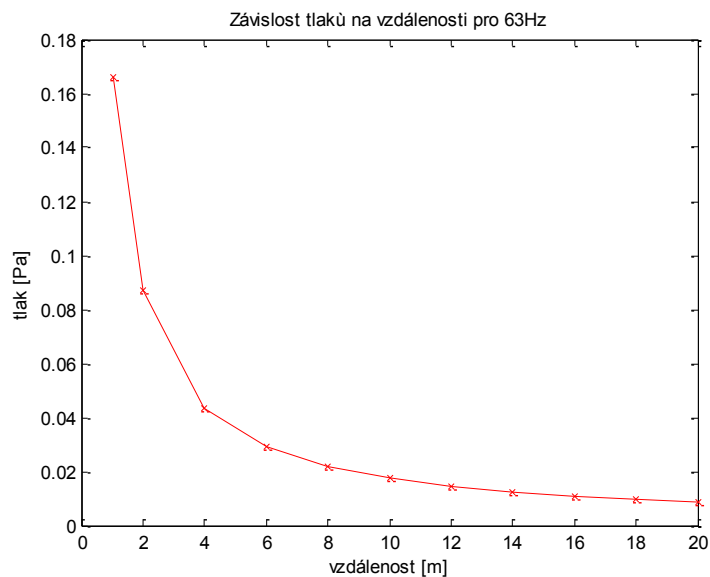
```
***** 63Hz *****
```

```
p63Hz =
```

```

    0.1660    0.0872    0.0436    0.0291    0.0218    0.0174    0.0145    0.0125    0.0109    0.0097
0.0087

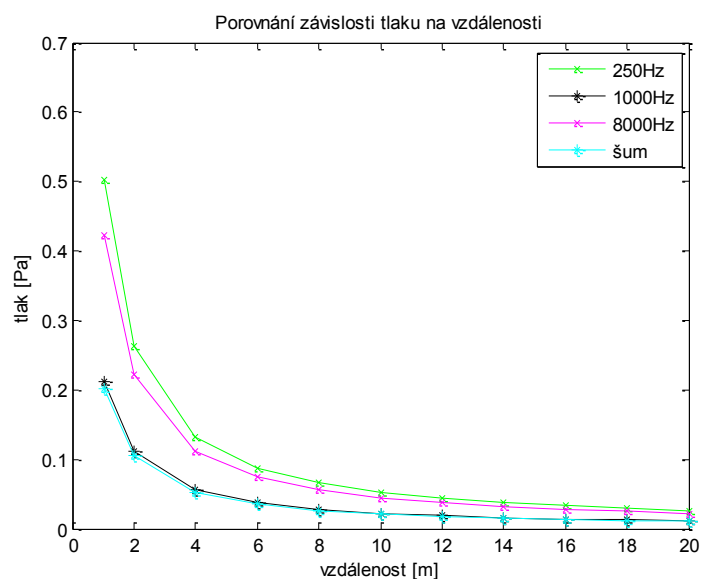
```



Graf 4.1 Závislost tlaků na vzdálenosti pro 63Hz

Výpis kódu pro zobrazení a porovnání čtyř signálů (250 Hz, 1000 Hz, 8000 Hz a širokopásmový šum) v jednom grafickém okně:

```
% společné okno pro 3 průběhy
figure()
plot (r, p250Hz, '-xg');
hold on
plot (r, p8000Hz, '-*k');
plot (r, p1000Hz, '-xm');
plot (r, p_sum, '-*c');
title ('Porovnání závislosti tlaku na vzdálenosti');
xlabel ('vzdálenost [m]');
ylabel ('tlak [Pa]');
legend ('250Hz','1000Hz','8000Hz', 'šum');
hold off
```



Graf 4.2 Porovnání závislosti tlaku na vzdálenosti a frekvenci

## 4.1.2 Modelování hladin akustických tlaků

Ukázka části kódu pro 63 Hz signál:

```
close all;
clear all;
clc

%*****
%***** Výpočty hladin akustického tlaku *****
%*****

r1 = 1.05;      % referenční vzdálenost
m = 2:2:20;     % vzdálenosti od zdroje zvuku
pr = 0.00002;  % referenční hodnota
```



```
%***** 63Hz *****
p1 = 0.166
px63Hz = [p1 ((p1*r1)./m)] % výpočet okamžitých tlaků a z nich se vypočte
Lp

fprintf ('Pro výpočet hladiny akustického tlaku se použije tento vztah:
Lp=20*log(px/pr).');
fprintf ('\nHladiny pro 63Hz [dB]:');
Lp63Hz = 20*(log10(px63Hz./pr)); % výpočet hladiny akustického tlaku
Lp63Hz
```

Výpis z Command window:

Pro výpočet hladiny akustického tlaku se použije tento vztah:  $L_p=20*\log(px/pr)$ .

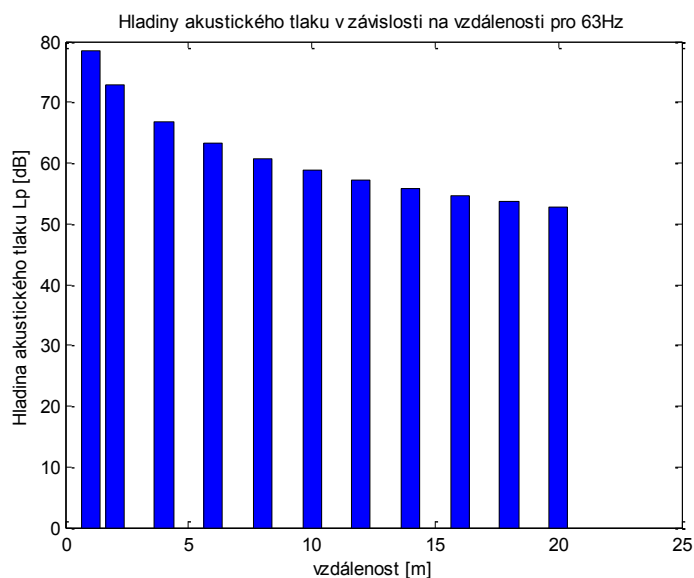
Hladiny pro 63Hz [dB]:

Lp63Hz =

```
78.3816 72.7847 66.7641 63.2423 60.7435 58.8053 57.2217 55.8828 54.7229 53.6999
52.7847
```

```
%***** Grafy *****
m2= [r1 m];

figure()
bar(m2,Lp63Hz,'b') % vykreslení sloupcového grafu
title ('Hladiny akustického tlaku v závislosti na vzdálenosti pro 63Hz');
% nadpis
xlabel ('vzdálenost [m]'); % x-ová osa
ylabel ('Hladina akustického tlaku Lp [dB]'); % popis osy y
```

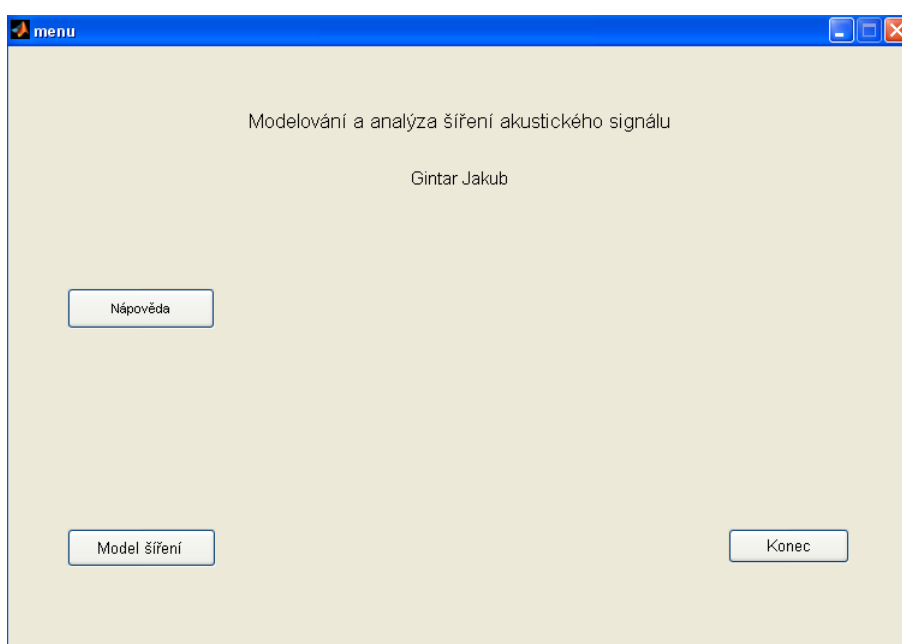


Graf 4.3 Hladiny akustického tlaku pro 63 Hz

## 4.2 Modelování šíření akustického signálu

Model je vytvořen ve formě grafického uživatelského rozhraní. Model simuluje námi provedené měření ve třetí kapitole této práce, to znamená, že pomocí modelu získáme rychlost šíření zvuku, průběhy na jednotlivých mikrofonech, závislost útlumu akustických hladin na vzdálenosti apod.

Program modelu se skládá ze dvou pracovních oken, první okno je pojmenováno jako „menu“. Obsahuje název bakalářské práce a jméno autora, může se zde také zobrazit nápověda k modelu a to stiskem tlačítka „Nápověda“. K samotnému modelu, který je na druhém okně se dostaneme pomocí tlačítka „Model šíření“. Tlačítko „Konec“ slouží k ukončení a k zavření programu.



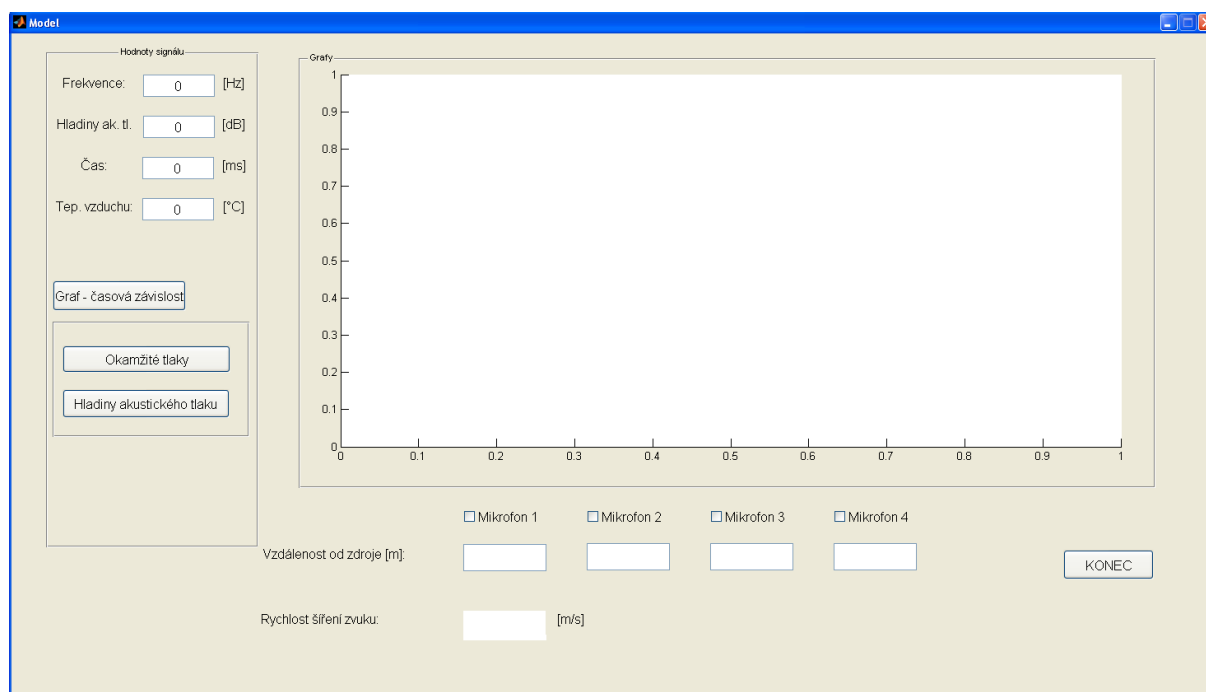
Obr. 4.1 První okno modelu šíření zvuku.

Druhé okno (Obr. 4.2), které představuje samotný model slouží k zadávání hodnot, provádí se zde potřebné výpočty a vykreslují se zde grafy a průběhy signálu.

Nachází se zde čtyři Edit Texty, které slouží pro zadávání hodnot nutných k zobrazení průběhů, a to frekvence, hladina akustického tlaku, čas a teplota vzduchu. Podle zadaného času se vypočte vzdálenost, do které se signál vykresluje.

Tlačítko „Graf – časová závislost“ vykreslí signál v závislosti na čase. Check Boxy „Mikrofon 1 – Mikrofon 4“ vykreslí v grafu další průběhy, které by byly ve skutečnosti na těchto mikrofonech naměřeny. Každý průběh mikrofону má svou barvu a jejich vzdálenost od zdroje zvuku je nastavena pomocí zbylých Edit Textů.

Tlačítka „Okamžité tlaky“ a „Hladiny akustického tlaku“ slouží pro vykreslení závislosti okamžitých tlaků na vzdálenosti, respektive hladin akustických tlaků na vzdálenosti. Tyto závislosti se vždy otevřou v novém grafickém okně.



Obr. 4.2 Druhé okno modelu šíření zvuku

## 5 Srovnání dosažených výsledků

Podle teorie rychlosti šíření akustického signálu, závisí rychlost šíření na fyzikálních vlastnostech látky, ve které se zvuk šíří, a ne na samotných vlastnostech zvuku. Ve vzduchu má největší vliv na rychlost šíření zvuku teplota vzduchu. Při praktickém měření rychlosti zvuku byla teplota v akustické komoře 21,5 °C, pomocí vztahu (2.1.1) jsme vypočetli teoretickou rychlost šíření zvuku a to:

$$c = (331,57 + 0,607 \cdot t) = (331,57 + 0,607 \cdot 21,5) = 344,62 \text{ m s}^{-1}$$

Naměřená rychlost zvuku zapsána v tabulkách č. 1-4 vycházela přibližně: 344,83 m·s<sup>-1</sup> a to pro různé frekvence. Hodnota rychlosti zvuku získaná v modelu šíření akustického signálu při 21,5 °C byla: 344,62 m·s<sup>-1</sup>, a to při jakékoliv zadané frekvenci.

Odchylka, která vznikla při měření v akustické komoře, mohla být způsobena nepřesným přečtením teploty na teploměru v komoře (teploměr měl desetinou stupnici), nebo mohla být způsobena nepřesným odečtením hodnot získaných během měření, ze kterých se rychlost šíření zvuku posléze počítala.

V další části byly změřeny hladiny akustických tlaků, tyto hladiny se měřily pro různé frekvence signálu (oktávy), a to z důvodu nezbytnosti uvádět u hladin akustického tlaku kmitočet, resp. Rozsah kmitočtů, ke kterému daná hodnota přísluší. Buď se uvádí celková hladina akustického tlaku, která je vlněním vyvolána v celém slyšitelném frekvenčním pásmu, nebo se uvádí jako hladina akustického tlaku v oktávovém pásmu.

Rozdíl naměřených a teoreticky vypočtených hladin akustických tlaků si můžeme prohlédnout v tabulce č. 3. 9. Jak si můžeme všimnout, nejmenší výchylky bylo získáno u signálu s frekvencí 16000 Hz, naopak největší výchylka byla vypočtena na signálu o frekvenci 250 Hz. Tato výchylka, která na šesti metrové vzdálenosti dosahuje hodnoty až 7 dB mohla být způsobena například fázovým posuvem signálu.

Dále můžeme pomocí naměřených a namodelovaných hodnot porovnat s teoretickým předpokladem sférický útlum. Ze vztahu (3.1.3) můžeme vypočíst, že pokud je vzdálenost mezi dvěma body dvojnásobná, bude mít hladina akustického tlaku útlum -6 dB. Při pohledu na naměřené hodnoty v tabulce č. 3. 5 a teoretické hodnoty hladiny akustického tlaku umístěné v tabulce č. 8 vidíme, že sférický útlum platí při každé frekvenci akustického signálu. Sférický útlum také vyčteme z grafu hladiny akustického tlaku, který můžeme nechat vykreslit v modelu šíření zvuku.

Podobně se ověří pokles okamžitých hladin v závislosti na vzdálenosti od zdroje zvuku, kdy při dvojnásobné vzdálenosti má okamžitý tlak poloviční hodnotu viz. tabulky č. 3. 6 a 3. 7, nebo graf „okamžité tlaky“ v modelu šíření akustického signálu.

## 6 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo provést analýzu šíření akustického signálu a pomocí aplikací matematických rovnic a algoritmů vytvořit model pro šíření zvuku.

Analýza šíření zvuku byla provedena nejprve v teoretické rovině, kde jsme se seznámili se základními fyzikálními vlastnostmi zvuku a jejími vzájemnými vztahy. Dozvěděli jsme se, že z hlediska akustiky existují dva druhy prostředí pro šíření akustického signálu, a to prostředí reálné a volné prostředí.

Reálné prostředí je každé prostředí, ve kterém dochází k deformaci a dalším jevům akustického signálu, jako je odraz, dozvuk ohyb akustické vlny apod. Naproti tomu se ve volném prostoru šíří zvuk ze zdroje volně všemi směry, a jeho šíření můžeme popsat vlnoplochami (spojnicemi všech míst zvukového pole, které mají vdaný okamžik stejné parametry).

V praktické části jsme si pomocí měření v akustické komoře ověřili, že rychlost šíření zvuku není závislá na frekvenci, ale na fyzikálních vlastnostech látky, kterou se zvuk šíří. Ve vzduchu nejvíce ovlivňuje rychlost šíření zvuku jeho teplota, a v menší míře také tlak vzduchu a jeho vlhkost. To jsme si také ověřili v modelu šíření zvuku, kdy při zadání konstantní teploty a měnící se frekvence byla rychlost zvuku stále stejná, ale při změně teploty byl i jen o jednotky  $^{\circ}\text{C}$  se rychlost šíření zvuku měnila dosti velkým rozdílem, například pro teplotu vzduchu  $10^{\circ}\text{C}$  vycházela rychlost zvuku  $337,64\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , ale při  $30^{\circ}\text{C}$  už byla rychlost zvuku  $349,78\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , což je rozdíl  $12,14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Dalším parametrem, který jsme si prakticky ověřili je sférický útlum. Ten nám říká: „Pokud je vzdálenost dvou bodů od zdroje dvojnásobná, bude mít hladina akustického tlaku mezi těmito body útlum  $-6\text{ dB}$ “ (viz tabulka č. 3. 8). Zároveň bude na vzdálenějším bodu poloviční okamžitý tlak než na bodě, který se nachází blíže ke zdroji zvuku (tabulka č. 3. 6).

Na základě vyhodnocení dosažených výsledků, jsem došel k závěru, že modelované a naměřené hodnoty souhlasí s tabulkovými hodnotami a teoretickými předpoklady, a vzniklé rozdíly mezi výsledky zapříčiněny měřením, zaokrouhlováním apod. jsou zanedbatelné.

# Seznam použité literatury

1. SEDLÁČEK, Miloš a Radislav ŠMÍD. *MATLAB v měření*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 2004, 204 s. ISBN 80-010-2851-8.
2. HUMLHANS, Jan a Radislav ŠMÍD. *Zajímavá zapojení: inspirace konstruktérům. 4. díl, Zapojení s diodami LED, zapojení s optočleny, různá zapojení, rejstřík*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 143 s. Inspirace konstruktérům. ISBN 80-730-0153-5.
3. PUNČOCHÁŘ J. *Operační zesilovače v elektronice*. 5. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002. 495 s. ISBN 80-7300-059-8.
4. NEVŘIVA, Pavel. *Analýza signálů a soustav*. 1. vyd. Praha: BEN-Technická literatura, 2000. 672 s. ISBN 80-7300-004-0.
5. BERNAT, P a Zacharskij, K. *Akustika, vznik a šíření zvuku, frekvenční analýza a syntéza, sluchový vjem zvukového signálu*. Dostupný z WWW:  
< [http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly\\_akustika.htm](http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm) >
6. NOVÝ, N. a KUČERA, M. *Snižování hluku a vibrací*. Dostupný z WWW:  
<[http://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni\\_materialy/SHV/Novy\\_Kucera\\_Snizovani\\_hluku\\_a\\_vibraci.pdf](http://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni_materialy/SHV/Novy_Kucera_Snizovani_hluku_a_vibraci.pdf)>
7. MIKULČÁK, Jiří a kol. *Matematické, fyzikální a chemické TABULKY a VZORCE pro střední školy*. 1. vyd. Praha: Prometheus, 2003. 277 s. ISBN 80-7196-264-3.

## Seznam použitých symbolů a zkratek

<b>Aj.</b>	a jiné
<b>Atd.</b>	A tak dále
<b>°C</b>	Stupeň Celsia
<b>c</b>	Rychlost šíření zvuku
<b>CPIT</b>	Centrum pokročilých inovačních technologií
<b>dB</b>	Decibel
<b>T</b>	Perioda
<b>f</b>	Frekvence
<b>GUI</b>	Grafické uživatelské rozhraní
<b>Hz</b>	Hertz
<b>hPa</b>	Hektopascal
<b>I</b>	Akustická intenzita
<b>kHz</b>	Kilohertz
<b>Log</b>	Logaritmus
<b>L<sub>p</sub></b>	Hladina akustického tlaku
<b>L<sub>w</sub></b>	Hladina akustického výkonu
<b>m</b>	Metr
<b>MIC</b>	Mikrofon
<b>Např.</b>	Například
<b>Obr.</b>	Obrázek
<b>p</b>	Akustický tlak
<b>Pa</b>	Pascal
<b>S</b>	Obsah polokoule
<b>Tab.</b>	Tabulka
<b>Teor.</b>	Teoretické
<b>Tj.</b>	To je
<b>Tzv.</b>	Tak zvané
<b>Z</b>	Zdroj zvuku
<b>Z<sub>0</sub></b>	Akustická impedance prostředí
<b>Δ</b>	Delta
<b>λ</b>	Lambda
<b>μPa</b>	Akustický tlak
<b>π</b>	Pí
<b>ω</b>	úhlový kmitočet

## **Příloha na CD**

Obsah CD:

Měření v čase - 250 Hz

Měření v čase - 1000 Hz

Měření v čase - 8000 Hz

Měření v čase – šum

Měření v délce

Hladiny\_akustickeho\_tlaku.asv

Hladiny\_akustickeho\_tlaku.m

Tlaky.ASV

Tlaky.m

menu.fig

menu.m

Model.asv

Model.fig

Model.m